中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 5 期: 1556 ~ 1572
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

冠层降水再分配驱动生态系统养分富集: 机制、数量与模式

袁川[1,2*†], 岳晓萍[1†], 张亚峰[3], 张瑜[4], 胡彦婷[5], 唐强[2], 郭立[6], 王帅[7], 段兴武[8], 项文化[5], 魏晓华[9], 李小雁[7]

1. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300;
2. 西南大学地理科学学院, 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000;
4. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024;
5. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004;
6. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;
7. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
8. 云南大学国际河流与生态安全研究院云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 昆明 650500;
9. Department of Earth, Environmental and Geographic Sciences, University of British Columbia (Okanagan), Kelowna, British Columbia V1V 1V7, Canada

* 通讯作者, E-mail: yuanchuan03@163.com
† 同等贡献

收稿日期: 2023-08-06; 收修改稿日期: 2024-01-25; 接受日期: 2024-02-01; 网络版发表日期: 2024-03-15
国家自然科学基金项目(41901038)、西南大学科研启动项目(SWU-KR24003)、城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2022-2-4)、重庆市杰出青年科学基金项目(cstc2021jcyjjqX0026)和西南大学青年团队专项资金项目(SWU-XDJH202306)资助

摘要 降水经冠层拦截后被再分配为穿透雨、树干茎流和截留损失, 大量元素随之汇入土壤, 影响土壤微生物群落结构、植株个体生存, 乃至植物群落演替, 构成了连接大气、叶际和根际的关键生态过程. 然而, 较之降水再分配水文过程, 缺乏对其养分富集效应的充分认识. 本文以冠层降水再分配驱动养分富集为主题, 整理2000~2022年Web of Science和中国知网数据库1020篇论文中关键离子K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}的浓度和淋溶系数, 总结养分富集机理, 对比了全球不同干湿区、温度带、植被和生态系统类型的养分富集特征. 结果显示, 树干茎流平均离子浓度(6.13mg L^{-1})约2.1倍于穿透雨, 二者SO_4^{2-}(12.45和6.32mg L^{-1})和Cl^-(9.21和4.81mg L^{-1})浓度最高, K^+(13.7和5.8)和Mg^{2+}(5.6和2.8)淋溶系数普遍最大. 极湿润区穿透雨和树干茎流离子浓度最低, 但淋溶系数最高; 冷温带离子浓度最高, 淋溶系数随温度增长无明显规律. 灌木、针叶植物、混交林、人工生态系统离子淋溶系数1.1至3.0倍于乔木、阔叶植物、纯林、自然生态系统. 当前研究多关注自然生态系统中阔叶乔木的冠层截留, 建议未来研究重视养分富集能力更强的灌木、针叶植物和人工生态系统, 结合土壤水分动态分析, 综合评估降水再分配对养分过程、格局乃至全球陆地植被系统养分收支的影响.

中文引用格式: 袁川, 岳晓萍, 张亚峰, 张瑜, 胡彦婷, 唐强, 郭立, 王帅, 段兴武, 项文化, 魏晓华, 李小雁. 2024. 冠层降水再分配驱动生态系统养分富集: 机制、数量与模式. 中国科学: 地球科学, 54(5): 1556–1572, doi: 10.1360/SSTe-2023-0179
英文引用格式: Yuan C, Yue X, Zhang Y, Zhang Y, Hu Y, Tang Q, Guo L, Wang S, Duan X, Xiang W, Wei X, Li X. 2024. Nutrient enrichment driven by canopy rainfall redistribution: Mechanism, quantification, and pattern. Science China Earth Sciences, 67(5): 1529–1544, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1267-8

© 2024 《中国科学》杂志社

关键词　生态水文, 降水再分配, 养分运移, 富集特征, 生物气候带

1　引言

大气沉降通过大气颗粒物、气体、气溶胶、雨、雪、雾等形态, 借助干沉降、湿沉降和隐匿沉降(Occult deposition, 即雾、露等)形式输入下垫面(Oyarzún等, 2005). 其中, 以雨、雪、大气颗粒物形态的大气沉降主要由重力作用驱动, 受下垫面属性的影响相对有限, 属于沉积型沉降(Precipitation deposition)(图1b)(Talkner等, 2010); 而主要以气溶胶和液滴(如雾等)形态被吸附, 或气体形态被吸收的沉降模式, 受下垫面种类、形态、化学成分等影响较强, 归属拦截型沉降(Interception deposition), 二者共同构成了森林养分补给的重要来源(图1a)(Lindberg等, 1986).

作为生态系统水分补给的重要来源, 降水在与大气沉降、冠层截获相互作用过程中与养分循环深度耦合, 改变了自身化学属性(Tonello等, 2021), 向土壤额外增添了不同种类的养分物质(Xu等, 2023), 不仅参与调控生态系统结构和功能, 并影响其类型及分布(夏军等, 2020). 其中, 冠层降水再分配驱动的养分富集是森林生态系统水分和养分循环的关键环节. 具体表现为, 降水经植被冠层拦截, 一部分被直接蒸发返回大气, 其余则以穿透雨和树干茎流汇至土壤(图1b)(Levia等, 2017), 形成了养分向冠层下方输运的重要通路, 同时也促进了地表枯落层分解、加速其矿化. 伴随冠层降水再分配过程, 大量湿沉降、冠层所截获的干沉降、植物分泌物和冠层生物排泄物汇集于土壤(魏晓华和周晓峰, 1989; 张亚峰等, 2013), 构成了植物生长季养分由叶际环境向根际环境富集的重要生态水文过程(van Stan等, 2021). 休眠季冠层如何高效截获富含盐基离子、碳氮元素的降雪(Małek, 2001), 森林冠层积雪如何通过影响地表反照率进一步作用于区域水分和能量收支平衡(Katsushima等, 2023), 是森林生态系统养分循环中同等重要、却常被忽视的关键环节.

冠层降水再分配高效驱动森林生态系统中的养分富集. 相较于凋落物分解, 沿降水再分配过程输运的养分以更易溶于水的无机态为主, 养分浓度也相对更高(Tucker等, 2020), 可显著缩短养分物质分解和矿化时间, 促进了植物根系对养分的吸收利用(魏晓华和周晓峰, 1993), 在特定生态系统中以钾、钠、硫元素为代表的养分年均补给量也更多(Parker, 1983), 呈现出养分补给数量和效率优势. 树干茎流携运养分仅占降水输运养分总量的5%~20%(Parker, 1983), 通常远小于穿透雨携运的养分总量(Su等, 2023). 不同于穿透雨汇入冠层下土壤的漫输入形式(Diffused input), 树干茎流汇集于枝干基部、呈点输入(Pointed input)的空间特征(Durocher, 1990), 以及更高养分浓度, 使得植物根区得到相对充分补给, 进而使得冠层下水分和养分分布形成新的空间格局, 入渗时间动态发生改变(Niu等, 2023), 影响土壤水分补给数量和效率(袁川, 2017). 这种冠层降水再分配过程参与的贯通“土壤-植被-大气连续体”的养分运移, 促进了地球关键带土壤水分、养分与微生物群落特定格局的形成和维持(朱永官等, 2015), 不仅作用于植被个体生长以及植被物种生存策略(赵文智和程国栋, 2001), 加速群落演替(刘世荣等, 2007), 提升土壤固持、水文调节、养分积累等关键生态系统服务功能(王彦辉, 2001; 余新晓, 2013; 欧阳帅等, 2021), 也深刻影响坡面、流域、景观乃至大陆尺度上的植被生态系统生产力(李小雁, 2011; 王根绪等, 2021)(图1c). 因此, 研究冠层降水再分配驱动的养分富集, 是充分理解陆地生态系统养分运移的必然要求, 可为全面认识地球表层系统结构和功能提供理论基础.

凭借雨水(或积雪融水)的溶剂、反应活化剂、输送载体等多重关键角色(Lu等, 2017), 冠层降水再分配驱动下养分循环与水文过程深度耦合, 在不同尺度的陆地生态系统中均发挥重要作用(李中恺等, 2022). 近年来蓬勃发展的地球关键带研究(Guo和Lin, 2016; 王云强等, 2016), 一定程度上促进了植株和样地尺度“土壤-植物”系统水养分耦合关系及其影响机制分析. 然而, 相较于由蒸腾等生理过程驱动(Yin等, 2022), 或受植被分布等生态格局影响的土壤水分动态研究(Moeslund等, 2013), 或基于根系调节的水分再分配(Hydraulic redistribution)及其对“土壤-植物”系统养分循环的影响分析(刘美珍等, 2006; 苏华等, 2014), 对冠层降水再分配驱动的养分富集效应研究(尤其大空间尺

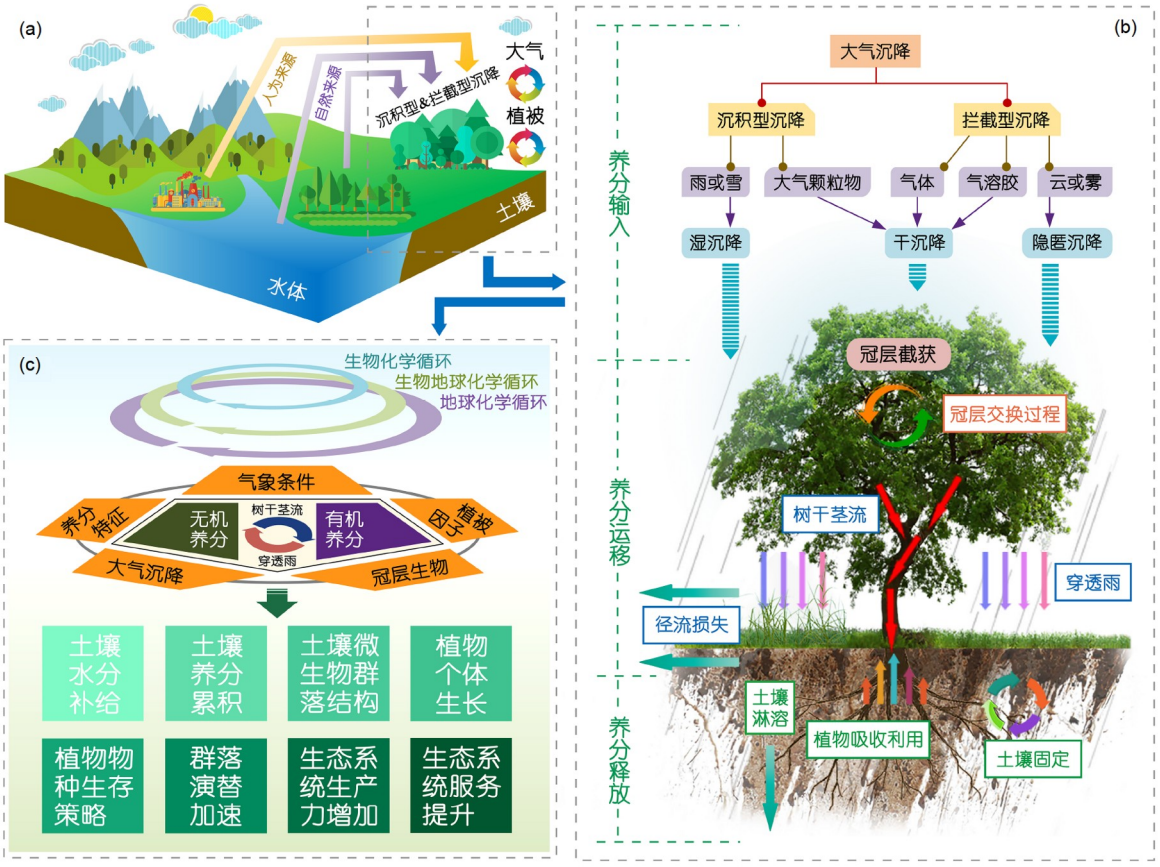

图 1　冠层降水再分配驱动的陆地生态系统养分循环示意图

(a)和(b)分别表示大尺度(如景观或生态系统)和小尺度(如样地或植株)上降水再分配驱动养分循环示意图. 其中, (b)中包含的大气沉降概念图改自Ulrich(1983)和Talkner等(2010); (c)展示其主要的影响因子及其生态意义

度)仍相对不足(图1b). 为此, Levia和Germer(2015)基于次降水和季节尺度, 充分探讨了冠层特征、植物群落演替、气象因子等对全球树干茎流溶解态和颗粒态养分富集特征的影响, 但缺失对冠层下土壤养分输入总量贡献最大的穿透雨的相关分析. 通过将穿透雨纳入分析, Aubrey(2020)系统总结了森林生态系统由降水再分配驱动的养分循环机理及其重要意义, 但缺失不同地理单元和植被类型之间的综合对比, 阻碍了对全球陆地植被生态系统水养分空间分布特征及其影响机制的全面认识. Yue等(2021)详细对比了全球不同生物群系(包括热带雨林、萨王纳、亚热带沙漠、北方森林、苔原等)冠层降水再分配的水量特征, 却未分析受其驱动的养分富集特征. 由此可见, 当前普遍缺乏大尺度上基于典型植物生活型、气候带、生态系统类型等对养分富集特征的对比理解, 同样缺乏微观尺度上基于植物体内水养分运移过程及其影响机理的透彻分析, 限制了我们对降水调控生态系统物质循环和能量流动重要性的全面认识, 不利于准确评估陆地生态系统对气候变化的生理生态响应.

为此, 本文基于Web of Science和中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库搜集整理了2000~2022年发表的1020篇文献, 归纳了基于微观过程的富集机理与影响机制研究进展, 系统对比了全球典型生物气候带间养分富集特征. 总结当前研究不足, 提炼未来发展方向, 以加深对陆地生态系统关键生态水文过程的认识, 为应对气候变化提供理论基础.

2　数据来源与筛选标准

冠层降水再分配驱动的养分富集效应研究, 涉及

环境科学、生态学、水文学、林学、地理学、植物学等诸多领域. 本文基于Web of Science平台Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)数据库, 以检索式“TS=((Throughfall or Stemflow or (“Rainfall Partitioning” or “Precipitation Partitioning”) or (“Rainfall Redistribution” or “Precipitation Redistribution”)) and (Nutrient* or Deposition or Cation* or Anion* or Ion* or Element*) and (Enrich* or Concentrat*))”, 对2000~2022年发表的、以冠层降水再分配驱动养分富集为主题进行文献检索. 截至检索日2022-11-16, 共搜集到68个国家(地区)合计831篇SCI论文. 为全面统计中国的研究成果, 本文进一步基于中国知网数据库(https://kns.cnki.net/), 利用检索式“SU=((‘降水再分配’+‘降雨再分配’+‘穿透雨’+‘穿透水’+‘树干茎流’+‘树干径流’+‘树干流’) * (‘养分’+‘沉降’+‘离子’+‘元素’+‘水化学’))”进行检索, 得到2000~2022年中文论文189篇. 因此, 本文以冠层降水再分配驱动养分富集为主题, 基于Web of Science和中国知网数据库共检索2000~2022年论文1020篇. 其中, 以基于自然生态系统的研究为主, 占论文总量的70.0%. 在剩余30.0%基于人工生态系统的研究中, 人工林生态系统研究占69.6%, 城市和农田生态系统占比仅分别为29.3%和1.1%, 其余生态系统类型占比不足1%(图2a), 凸显出当前研究对人工生态系统, 尤其是城市、农田等生态系统类型的关注不足. 按生活型分类, 绝大多数论文以乔木为研究对象, 占比高达96.8%; 而灌木和草本研究分别仅占论文总量的2.4%和0.8%(图2c). 在降水类型上, 绝大多数研究关注降雨(98.7%), 降雪相关研究仅占1.3%.

为深入理解水分和温度对冠层降水再分配驱动养分富集的影响, 探讨该影响在典型地理单元和植物类型间的普遍范式, 本文分别以年均降水量和柯本气候带为依据, 在全球尺度上开展量化分析, 总结降雨、穿透雨和树干茎流中关键无机离子的富集机理、特征和主要影响因子. 首先, 根据区域水分条件差异, 并考

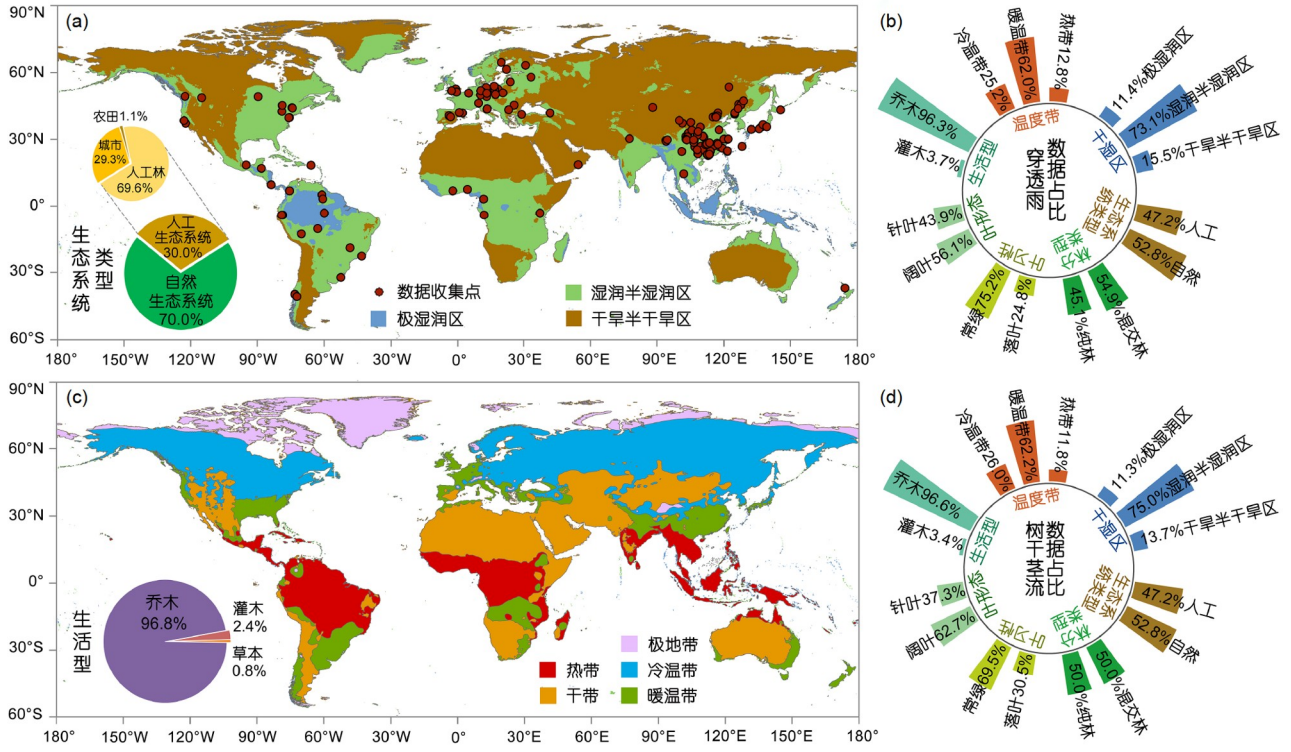

图 2　文献数据来源分布示意图

(a)和(c)表示按本文标准筛选后在不同干湿区和温度带的数据样点全球分布, 以及在不同植物生活型和生态系统类型之间的论文数量对比; (b)和(d)表示穿透雨和树干茎流样本数据在不同气候带和植被类型间的占比. (c)来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)

虑不同干湿分区样本数据代表性，本文借鉴席承藩等(1984)与Zittis等(2021)分类标准，以年均降水量≤600mm、600~2000mm、>2000mm作为划分干旱半干旱区、湿润半湿润区、极湿润区的依据(图2a). 其中，年均降水量数据来自WorldClim数据库(https://worldclim.org/). 参考柯本气候带分类的温度标准(Köppen, 1936; Beck等, 2018), 进一步划分为热带(最冷月气温≥18℃)、暖温带(最热月气温>10℃，且最冷月气温0~18℃)、冷温带(最热月气温>10℃，且最冷月气温<10℃)、极地带(最热月气温<10℃)(图2c)(王婷等, 2020). 划分温度带的具体数据, 来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心的全球柯本气候类型空间分布数据集(1901~2000年)(http://www.geodata.cn). 受制于数据相对匮乏, 本文不探讨降雪类型, 或极地带的冠层降水再分配特征. 此外, 本文未将PO_4^{3-}、颗粒态和有机养分(如可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)等)，以及随冠层降水再分配迁移的微生物、重金属污染物、放射性元素等纳入分析. 因此, 根据上述标准对1020篇检索论文进行数据筛选, 本文重点对比雨水(n=195, 表示“观测点数量”, 下同)、穿透雨(n=193)和树干茎流中(n=124)的K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}离子浓度及其淋溶系数(图2b和2d).

3 冠层降水再分配驱动的养分运移及其影响因子

3.1 养分输运过程

由冠层降水再分配驱动的陆地生态系统养分富集过程, 涉及养分输入、运移和释放, 构建了贯通大气、植被、土壤三个重要近地表圈层的物质输运通道(图1a和1b). 首先是养分输入过程, 包括湿沉降(即溶解在雨水中的气溶胶颗粒物)和干沉降(即以自身末速度沉降的大气颗粒物). 冠层空气动力学参数特性使得冠层对干沉降的捕获能力较强(Erisman和Draaijers, 2003), 尤其植物生长季的复杂枝叶结构进一步促进了干沉降在冠层沉积(Freer-Smith等, 2004). 宿居冠层的生产者、消费者和分解者的排泄物与残体，经雨水冲刷可转移大量养分, 使得养分输入来源更加复杂(Dantas de Paula等, 2021). 若将冠层视为相对封闭的独立系统, 包括养分输入(干湿沉降和隐匿沉降)、冠层交换、养分输出(穿透雨和树干茎流养分富集)的养分平衡，决定了冠层通过拦截降水最终起到养分“源”或“汇”效应(Talkner等, 2010). 以样地尺度养分平衡为例(图1b), 当输入冠层系统的总养分量(如经降水携运和沉降拦截)多于地表养分输入(主要经穿透雨和树干茎流携运)时, 冠层对养分主要起到吸收作用，表现为养分汇；反之, 冠层对养分主要起淋溶作用, 则表现为养分源.

其次是养分运移过程. 养分在“漏斗形”冠层内汇集，由树干茎流输送到枝干基部后，沿“倒漏斗形”优先流通道直达根区(Guo等, 2020). 由于树干茎流在冠层滞留时间长(Yuan等, 2019)、养分浓度高，其“点输入”模式使得养分集中分布于根际(Mantovani等, 2022). 呈“漫输入”模式的穿透雨，补给土壤养分总量大、范围广，存在特定的空间格局(Zimmermann等, 2008). 换言之，树干茎流具有养分补给的浓度和效率优势，而穿透雨具有数量和范围优势(Yuan等, 2022), 二者均参与养分循环, 共同维持土壤养分动态平衡.

随后是养分释放过程. 除被植物直接吸收, 以及被枯落物、腐殖质和土壤胶体等吸附外，经穿透雨和树干茎流输送的大部分养分最终进入土壤养分库(de Oliveira Leite和Valle, 1990). 其中部分养分沿地表径流、壤中流等输出系统，输出数量和速率受降水特征、土壤性质、植被类型、地形条件等综合影响，是养分在陆地生态系统间、“陆地-水体”间迁移的重要方式. 若自然或人为干扰较大，导致养分输出不断增加, 则可能加速生态系统养分失衡.

3.2 影响养分输运的因子

冠层降水再分配驱动的养分富集过程受气象条件强烈影响，主要影响因子包括降水量、降水强度、历时、间隔时长、降水形式等(Zhang等, 2023). van Stan等(2012)发现穿透雨中养分浓度与降水历时、间隔时长呈正相关, 而与降水量、降水强度呈负相关. 可能原因在于当降水强度低、历时长、间隔久时，趋缓的雨水利于携运冠层干沉降(Zhang等, 2016). 尤其当气温较低时，增加的雨水黏滞性和表面张力进一步延长了与冠层的接触时间(Levia和Herwitz, 2000)，使得枝叶表面水分易于饱和，有助于可溶性养分从植物组织中渗出，促进了养分在穿透雨和树干茎流中富集(Herwitz和Levia, 1997). 此外, Levia(2003)发现树干茎流中

最高养分浓度通常出现于雪转雨, 其次为雨、雨转雪, 而最低浓度易出现在雪、雨夹雪和暴雨的降水类型中.

冠层特征、枝干形态和叶功能性状等植被特征, 以及冠层生物群落结构, 是影响冠层降水再分配驱动养分富集的重要生物因子(Levia和Germer, 2015). 其中, 起重要作用的冠层特征包括冠层厚度、冠幅、郁闭度和物候期. 较大冠层截留面积有利于树干茎流汇集(Martinez-Meza和Whitford, 1996), 马尾松(*Pinus massoniana*)(黄智军等, 2018)、欧洲水青冈(*Fagus sylvatica*)和欧洲云杉(*Picea abies*)(Adriaenssens等, 2012)穿透雨和树干茎流中K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子浓度, 均随郁闭度和冠层厚度增加而升高. 但在养分富集效率上, 小乔木和灌木植株通常较高的汇流率(Yuan等, 2016)可起到积极作用(Mantovani等, 2022). 关于物候期如何影响养分富集, 当前研究仍存争议. 部分研究发现, 由于植物休眠季叶片脱落、冠层生物活动减少, 穿透雨和树干茎流中养分浓度显著低于生长季(Levia等, 2012); 另一部分研究则认为尽管休眠季植物组织活性降低、冠层吸收趋弱, 但增强的冠层淋溶可提高养分浓度(Sheng等, 2022). 研究结果显示, 植株形态、树皮结构(Mantovani等, 2023)、物候特征(如落叶期等)(Brinson等, 1980)等强烈影响养分随降水再分配过程向冠层下输运. 对输运路径相对复杂、与枝叶接触时间较长的树干茎流, 该影响尤为突出. 通过对比输运路径分别为仅枝叶(Canopy-only)、仅茎干(Stem-only)、完整茎叶体系(Canopy-stem)的树干茎流产量和离子浓度, Koichiro等(2001)发现树皮具备良好的储水能力, 也证明不同输运阶段的茎流中无机养分存在种类和数量差异. 在此基础上, Tucker等(2020)以树皮沟纹(Furrow)连接网状结构为表征, 构建量化树皮微结构复杂性的数学表达, 发展了养分的茎流输送模型, 为深入研究茎流所携运养分在树皮中的动态迁移提供了新方法. 此外, 粗糙树皮易吸附干沉降提高养分浓度(Levia等, 2011), 也易阻塞输运通道抑制树干茎流而减少养分输入, 因此如何影响养分富集存在权衡(Oka等, 2021a, 2021b). 截留雨水中的养分绝大多数呈溶解状无机态, 可被冠层直接吸收利用(Chuyong等, 2004). 尤其在大气湿度较高的情况下, 与植物组织间的水势差有利于驱动雾、露等隐匿沉降中的部分养分为叶片所吸收, 并在体内运输、积累、循环、利用和再分配, 直接参与植物体生物代谢过程(Marschnert等, 1997; Yan等, 2015). 同时, 浓度差形成的渗透压会造成植物体内养分部分淋溶至雨水中(Johnson和Lehmann, 2006), 经穿透雨和树干茎流输运, 最终融入土壤生物地球化学循环, 乃至输出并参与其他生态系统的地球化学循环.

相较于冠层特征和枝干形态, 叶功能性状研究相对不足, 与叶片对养分富集的重要作用不匹配. 作为冠层重要组成部分, 叶片面积、倾角、排列形式、被毛情况、表皮疏水性等影响对降水的有效拦截(Garcia-Estringana等, 2010; Yuan等, 2017). 其次, 叶表是干沉降中可溶性组分的主要汇集区(Xu等, 2019), 叶片组织浓度显著作用于冠层淋溶和吸收. 因此, 对叶功能性状如何影响养分富集认识不足, 不利于充分理解植物为优化水养分资源获取的形态适应机制, 也阻碍了深入理解不同水养分条件下的植物生理生态反馈作用.

附生植物、植食性动物、叶际微生物共同构成了冠层生物群落多样性(沈浩等, 2017), 作用于冠层降水再分配驱动的养分富集过程. 首先, 附生植物截获树干茎流获取养分的同时, 亦可通过冠层交换作用影响树干茎流养分浓度(van Stan和Pypker, 2015). 其次, 冠层动物和微生物的排泄、分解等生命活动增加了穿透雨和树干茎流中养分含量(Arango等, 2019), 大量食物(Beard等, 2002)、eDNA(the environmental DNA)(Mullin等, 2022)等生物化学复合信息随之传递, 有助于开展物种保护、解译生态系统养分平衡等.

养分来源和溶质特性直接影响冠层降水再分配驱动的养分富集过程. 比如, 较之生境条件相似的朝向山区侧坡面, Chiwa等(2003)发现城市朝向的坡面植被截获人为源干湿沉降较多, 穿透雨中NO_3^-和SO_4^{2-}量明显更高. 类似现象同样出现在人为源较少的热带雨林中. 山脊雨林比山谷雨林截留更多干沉降(Hofhansl等, 2011), 导致山脊雨林穿透雨和树干茎流中养分通量更大(Holder, 2004). 此外, 可溶性物质是随冠层降水再分配运移的主要养分形态, 其溶质特性强烈影响养分富集. 比如, Sheng等(2022)发现落叶松(*Larix gmelini*)穿透雨和树干茎流中K^+浓度显著高于Ca^{2+}. 原因可能在于Ca^{2+}、Mg^{2+}与细胞壁、叶绿体和酶结合紧密(Adriaenssens等, 2012), 而K^+通过形成弱配合物具备较强移动性, 在冠层交换作用下易从植物组织滤出. 对于难溶性物质, 随冠层降水再分配运移的颗粒物粒

径一般为0.45~500μm(Levia等, 2013), 其中树干茎流携运颗粒物粒径通常小于穿透雨, 且更接近球形(Cayuela等, 2019).

综上, 冠层降水再分配驱动的养分富集过程涉及养分的输入、运移和释放. 当前研究主要关注前两个阶段, 对穿透雨和树干茎流携运养分如何在土壤中富集和转化重视不足. 此外, 气象条件、植被特征、溶质特性强烈影响养分在穿透雨和树干茎流中富集, 三者相互耦合共同施加作用(图1c). 然而, 为便于分析或准确量化各自影响, 当前研究多将其作为独立因子开展分析. 对于生物影响因子, 冠层生物群落结构相较于冠层特征、枝干形态被严重忽视, 这与群落结构复杂、物种组成变异性大、野外观测难度高有关. 因此, 建议未来研究重视因子间的综合影响, 创新野外观测手段, 揭示冠层微生物活动影响养分富集过程的机理, 尤其是如何影响根际微生物物种组成参与养分释放, 这不仅是研究冠层降水再分配驱动养分富集影响机制的重点与难点, 也是深入理解陆地生态系统养分循环的基础.

4 养分样品收集与量化方法

4.1 采样与分析方法

植被冠层是大气沉降的重要生物载体. 冠层沉积养分包括溶解态和颗粒态, 前者又可细分为有机和无机养分(Heshmatol Vaezin等, 2021). 有机养分常通过DOC和DON表征, 二者构成了土壤有机碳库和氮库的重要组分, 也是植物碳、氮养分的直接来源(苏冬雪等, 2012). 无机养分指标涉及K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}等, 属于土壤水溶性盐基离子, 其浓度、数量和迁移转化动态对土壤理化性质和植物生长至关重要. 比如, Na^+可激活植物体内抗氧化酶建立防御体系, 增强渗透调节以控制膜脂过氧化, 提高旱区植被的抗逆性(周瑞莲等, 2012). Cl^-通过参与光合作用调节酶活性, 维持叶片渗透压和膨压, 进而维持植物水分平衡(Franco-Navarro等, 2016). 以上指标均为当前冠层降水再分配驱动养分富集研究的重要养分指标, 使用主流测量设备、合理的预处理方法有利于保证养分浓度分析的可靠性和准确性. 为此, 本文归纳了重要养分指标的常见仪器分析方法和预处理要求, 如网络版附表S1(http://earthcn.scichina.com)所示.

作为携运养分至冠层下土壤的重要载体, 准确收集穿透雨和树干茎流十分重要. 常用的穿透雨收集装置包括漏斗型和槽型收集器. 前者主要适用于收集面较小、对不同收集方位有要求的研究, 常用于单株或样地尺度; 后者则常适用于坡面和生态系统尺度、收集面较大的观测实验. 穿透雨取样包括固定(Stationary)和流动(Roving)方式. 固定式是将收集装置在整个观测期保持不变, 而流动式则定期或不定期将其随机放置. Yuan等(2022)在样地尺度将冠层划分为四象限, 于象限中心固定摆设收集装置, 在各象限其余位置将其随机摆设, 并不定期更换位置, 可较好地结合固定式和流动式优点. 对于树干茎流, 可在枝干下端安装截水环, 用导管将截留水分导入地面集水装置加以测量和取样. 常采用旋转胶管法用于乔木的树干茎流测量, 而锡箔漏斗法是收集枝干较小的灌木树干茎流主要采用的实验手段(袁川, 2017).

4.2 富集指标与计算方法

当前研究多使用富集系数(Enrichment ratio)和淋溶系数(Enrichment factor)来描述冠层降水再分配驱动的养分富集效应. 其中, 富集系数(公式(1)~(2))量化了穿透雨和树干茎流中养分总量较之降水中养分总量的倍数关系(Levia和Herwitz, 2000). 尤其对于树干茎流, 该指标充分考虑了茎流在土壤中的汇集区域, 相对准确地反映了冠层降水再分配驱动下基于植株单位基面积的养分总量对比, 具有重要的生态学意义. 淋溶系数(公式(3)~(4))则仅量化了穿透雨和树干茎流中养分浓度较之降水中养分浓度的倍数关系(Tonello等, 2021). 尽管该指标未考虑汇流区域, 但其简单的数量关系有利于开展跨区域、生活型、物种的养分富集效应对比, 具有较好实用价值. 富集系数或淋溶系数大于1表明穿透雨和树干茎流可富集养分; 小于1, 则表明养分可能主要被冠层截留吸收. 由于难以获取计算富集系数所必需的枝干面积, 本文采用淋溶系数统一表征养分富集效应.

$$ER_{TF} = (V_{TF} \times C_{TF}) / (P \times C_P), \quad (1)$$

$$ER_{SF} = (V_{SF} \times C_{SF}) / (P \times C_P \times BA), \quad (2)$$

$$EF_{TF} = C_{TF} / C_P, \quad (3)$$

$$EF_{SF} = C_{SF} / C_P, \quad (4)$$

式中，ER_{TF}、ER_{SF}分别表示穿透雨和树干茎流的富集系数(无量纲)；EF_{TF}、EF_{SF}分别为二者淋溶系数(无量纲)，C_{TF}、C_{SF}则为二者养分浓度(mg L^{-1})；V_{TF}、V_{SF}分别表示穿透雨量(mm)和树干茎流量(mL)；P和C_P分别为次降水数量(mm)和降水养分浓度(mg L^{-1})；BA表示植株胸高断面积或枝干基面积(mm^2).

5　养分富集特征

5.1　干湿区之间富集特征对比

从干旱半干旱区(降水n=30，穿透雨n=30，树干茎流n=17)，至湿润半湿润区(降水n=144，穿透雨n=141，树干茎流n=93)、极湿润区(降水n=21，穿透雨n=22，树干茎流n=14)，树干茎流和穿透雨中无机养分淋溶系数总体随降水量增加而增大(图3)．不同于降水中离子浓度随降水量增加而减少，穿透雨和树干茎流中的无机养分浓度(比如Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-})在湿润半湿润区最高．此外，无论降水、穿透雨或树干茎流，在湿润半湿润区浓度通常与干旱半干旱区浓度之间差异不显著(p>0.05)，二者与在极湿润区浓度之间差异显著(p<0.05)(附表S2)．作为典型的海盐离子(Koichiro等, 2001)，造成上述趋势的部分原因可能在于水养分大气输运、区域沉降和局部富集过程的复杂性．比如，季风环流携带海盐气溶胶向内陆输送，强烈影响降水中Na^+、Cl^-等本底浓度(Jiang B等, 2021)，而输运过程中工农业生产和化石燃料燃烧等人为干扰继续增加降水

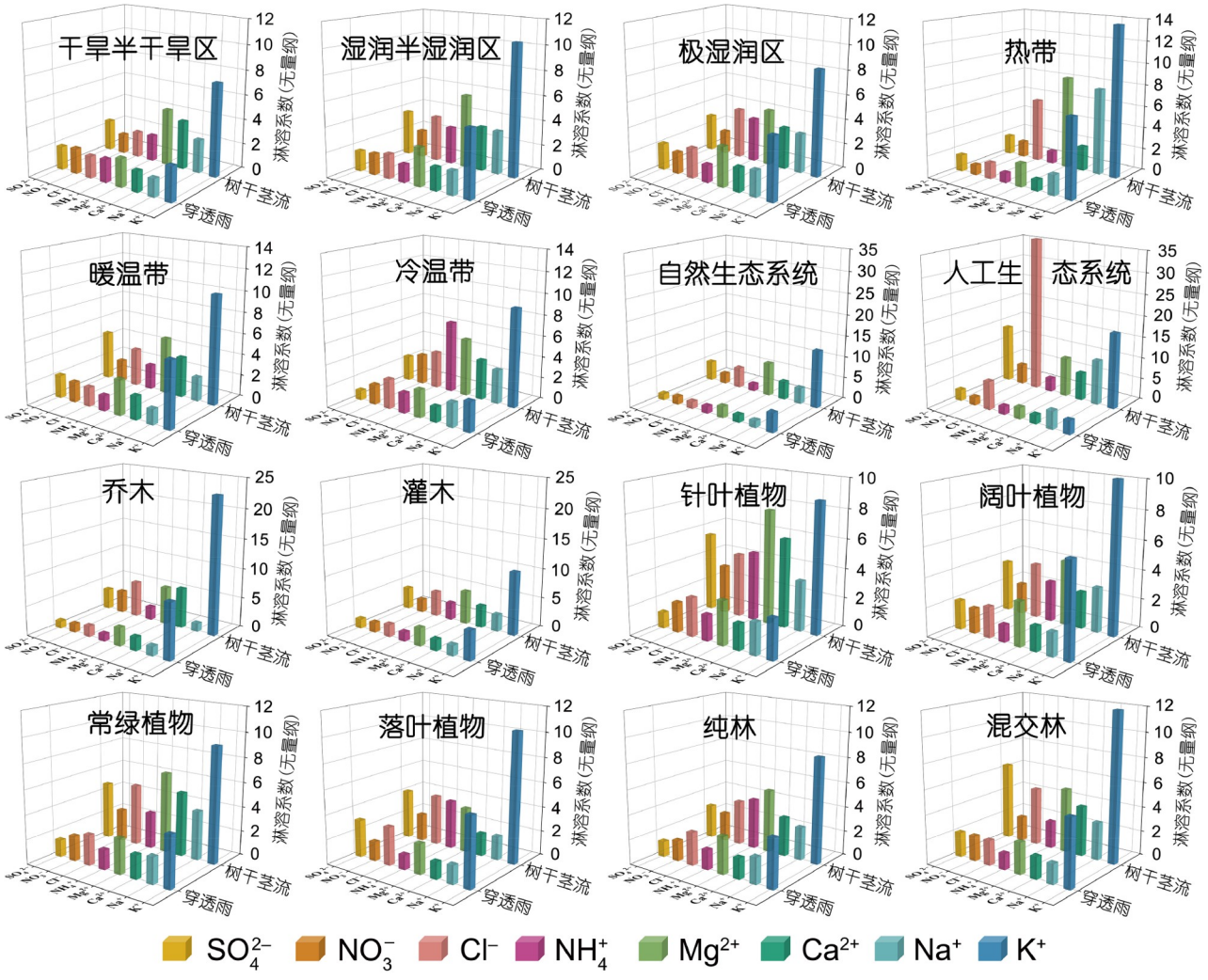

图 3　冠层降水再分配驱动下基于淋溶系数的养分富集效应对比

中的NH_4^+、NO_3^-、SO_4^{2-}等浓度(易浩宇等, 2014), 导致穿透雨和树干茎流中部分离子浓度存在特定的空间异质性.

不同于在降水中平均浓度居前的无机养分SO_4^{2-}(3.80mg L^{-1})、Cl^-(2.55mg L^{-1})、Ca^{2+}(2.11mg L^{-1})、NO_3^-(1.24mg L^{-1}), 以上排序在树干茎流和穿透雨中发生了变化(图4). 尽管SO_4^{2-}依旧居首(分别为12.45和6.29mg L^{-1}), 但居中离子变更为Cl^-(分别为9.19和4.81mg L^{-1})和K^+(分别为9.65和4.14mg L^{-1}), 随后为Ca^{2+}(分别为8.17和3.72mg L^{-1}). 排序变化首先反映了K^+在冠层降水再分配驱动下沿降水梯度发生了明显富集, 但穿透雨和树干茎流中K^+平均浓度在不同干湿区差异不显著(p>0.05). 该趋势在淋溶系数中得到了充分印证. 穿透雨和树干茎流中K^+淋溶系数在本文统计的所有无机养分中高居第一(分别为13.7和5.8), 远高于紧随其后的Mg^{2+}(5.6和2.8)、Ca^{2+}(4.7和1.9)、Cl^-(3.9和1.9). 基于对委内瑞拉卡奈玛国家公园中原始森林, 以及受较强、较弱山火影响的次生林实地观测, Dezzeo和Chacón(2006)同样发现K^+淋溶系数最高, 其穿透雨淋溶系数(24.4、23.3和18.4)约4.0倍和2.1倍于紧随其后的Mg^{2+}(5.8、5.8和5.0)和Ca^{2+}(11.3、7.8和13.0), 在树干茎流(42.4、32.9和30.5)中分别约6.2倍和2.1倍于二者淋溶系数(5.3、5.2和6.7; 17.0、10.5和22.0). 可能原因是K^+在植物细胞内易形成弱配合物, 较之与植物细胞壁、叶绿体、酶等紧密结合且易被叶片直接吸收吸附的Ca^{2+}、Mg^{2+}等(魏晓华和周晓峰, 1989), K^+移动性更强, 易于从植物组织内释放(Siegert等, 2017), 在冠层淋溶作用下而富集. 参照浓度和淋溶系数排序, 同样可发现冠层降水再分配对Mg^{2+}具有重要的富集作用. 上述趋势在干旱半干旱区、湿润半湿润区和极湿润区中均有体现(图4).

5.2 温度带之间富集特征对比

从热带(降水n=23, 穿透雨n=24, 树干茎流n=14)至暖温带(降水n=120, 穿透雨n=116, 树干茎流n=74)、冷温带(降水n=47, 穿透雨n=47, 树干茎流n=31), 树干茎流和穿透雨中无机养分浓度随温度降低总体呈提高趋势(图4). 原因可能在于温度较高的区域通常植被分布广泛, 蒸腾和蒸发旺盛加速了区域水汽循环, 增多的降水场次和降水量增加了穿透雨量和树干茎流量(Levia, 2003), 对其中离子浓度起到了稀释作用. 在不同温度带之间, 树干茎流和穿透雨中平均浓度较高的离子依次为Cl^-(20.81和8.10mg L^{-1})、SO_4^{2-}(17.00和7.95mg L^{-1})、K^+(10.90和4.79mg L^{-1})和Ca^{2+}(9.09和4.20mg L^{-1})(附表S3), 但仅Ca^{2+}平均浓度在不同温度带间差异显著(p<0.05), 且该排序与干湿区离子浓度排序较为接近. 然而, 无机养分沿温度梯度的淋溶系数变化则不如沿降水梯度的趋势明确. 具体表现为, 随温度降低, 树干茎流中主要有Ca^{2+}、NH_4^+、NO_3^-和SO_4^{2-}、穿透雨中有Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-和NO_3^-淋溶系数呈增大趋势, 其余离子淋溶系数则总体随之减小(图3). 这可能与气象因子对冠层降水再分配的作用相对明确(Yuan等, 2017), 较之大气温度以降水量起主导作用有关(Zhang等, 2020).

K^+是不同温度带之间在穿透雨和树干茎流中富集效应最突出的无机养分(图4), 由降水中平均浓度1.05mg L^{-1}, 陡增至树干茎流中10.90mg L^{-1}和穿透雨中4.79mg L^{-1}. 鉴于钾元素在土壤中移动性较强, 淋溶作用易导致植物根际钾亏缺(Johnson和Lehmann, 2006). K^+受冠层降水再分配驱动, 尤其在树干茎流中的有效富集有助于缓解植物生长对钾元素的正常需求.

在全球尺度上, 降水、穿透雨和树干茎流离子浓度与年均降水量呈现拟合程度不一、总体偏弱的幂函数关系(R^2≤0.43), 随年均降水量增加呈现相对明显的下降趋势(p<0.01)(附图S1和S2), 可能与降水量增加对养分浓度的稀释作用有关. 然而, 穿透雨和树干茎流离子淋溶系数与年均降水量之间的幂函数关系则相对更弱(R^2≤0.41, p<0.01), 随年均降水量增加的增长(如穿透雨中K^+、Mg^{2+}和树干茎流中NO_3^-等)和下降(穿透雨和树干茎流中Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}等)趋势并不统一(附图S3), 突出了冠层降水再分配驱动的离子富集过程受包括降水本底浓度等诸多环境因子的复杂影响. 与之类似, 穿透雨和树干茎流各离子淋溶系数, 以及降水、穿透雨和树干茎流各离子浓度随年均温增加的变化趋势同样不一致. 比如, 降水中K^+、穿透雨中NO_3^-、树干茎流中K^+和NO_3^-浓度随年均温增加而下降(p<0.01), 降水中SO_4^{2-}、树干茎流中NH_4^+、穿透雨中SO_4^{2-}和NH_4^+浓度则随之呈增加趋势(p<0.01)(附图S4). 穿透雨中K^+、

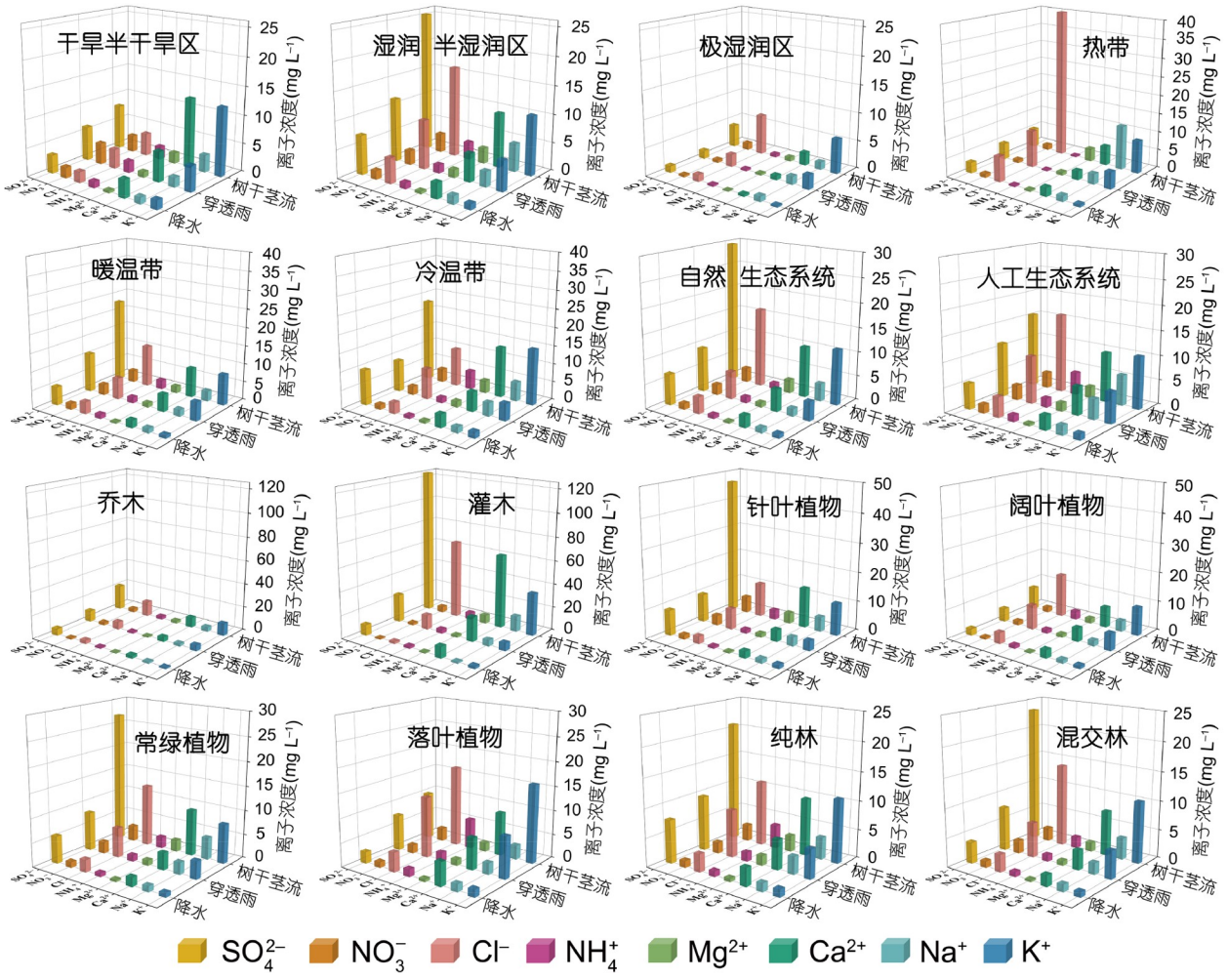

图 4　冠层降水再分配驱动下基于离子浓度的养分富集效应对比

Mg^{2+}和Cl^-淋溶系数随年均温增加而增加(p<0.01)，树干茎流中Na^+、Mg^{2+}和Cl^-淋溶系数则随之下降(p<0.01)(附图S5). 上述相对复杂的变化趋势可能与年均温增加引起蒸发加强从而造成降水、穿透雨和树干茎流离子浓缩效应，以及蒸发加强引起区域降水量改变的复杂影响有关. 当前全球面临气候变化的影响越发突出，由此引发的降水量和温度变化势必通过包括降水、穿透雨、树干茎流在内的重要生态水文途径，对陆地植被生态系统水分、养分平衡产生深远影响，其作用机理、预期影响程度和范围等亟待未来研究深入分析.

5.3　不同植被类型富集特征对比

本文以生活型(乔木和灌木)、叶形态(针叶和阔叶)、叶习性(常绿和落叶)、林分类型(纯林和混交林)为分类标准，基于8种离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-})，分别总结了不同植被类型在冠层降水再分配驱动下的养分富集特征.

(1) 生活型. 冠层降水再分配驱动下，灌木(降水n=6，穿透雨n=7，树干茎流n=4)的养分富集能力明显强过乔木(降水n=183，穿透雨n=180，树干茎流n=115). 除穿透雨中NO_3^-浓度偏小(6.36 vs. 12.41mg L^{-1})之外(附表S4)，灌木树干茎流和穿透雨中其余离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-、SO_4^{2-})浓度平均约4.1倍和2.3倍于乔木(图4). 然而，仅穿透雨中Ca^{2+}和Mg^{2+}，以及树干茎流中Na^+、Ca^{2+}、Cl^-平均浓度在不同生活型间差异显著(p<0.05)(附表S4). 相似规律同样体现在

淋溶系数上，灌木树干茎流和穿透雨无机养分淋溶系数分别平均是乔木的3.0倍和1.5倍(图3).

(2) 叶形态. 针叶植物(降水n=49, 穿透雨n=50, 树干茎流n=31)相较于阔叶植物(降水n=64, 穿透雨n=64, 树干茎流n=52)具有富集养分的浓度优势, 在树干茎流和穿透雨中的离子浓度平均是阔叶植物的2.2倍和1.3倍(图4). 该优势在树干茎流中尤为明显, 除Cl^-浓度偏小(11.71 vs. 14.86mg L^{-1})之外(附表S5), 其余离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、NO_3^-、SO_4^{2-})在针叶植物树干茎流中的平均浓度均高于阔叶物种, 但上述8种离子浓度在叶形态间差异均不显著(p>0.05)(附表S5). 针叶植物树干茎流和穿透雨无机养分淋溶系数分别平均是阔叶物种的1.5倍和1.1倍(图3), 同样支持冠层降水再分配驱动下针叶物种具有相对更优的养分富集能力. 这可能与针叶比表面积较高, 可相对高效沉积大气颗粒物有关.

(3) 叶习性. 常绿植物(降水n=97, 穿透雨n=94, 树干茎流n=57)相较于落叶植物(降水n=27, 穿透雨n=31, 树干茎流n=25)在树干茎流中具有明显的养分富集优势, 不仅离子浓度和养分淋溶系数分别平均1.2倍和1.5倍于落叶物种(图3和图4), 浓度更高的离子种类也更丰富(Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NO_3^-、SO_4^{2-})(附表S6). 然而, 在穿透雨中却是落叶植物养分富集能力更强, 离子浓度和淋溶系数平均分别为常绿植物的1.4倍和1.1倍, 浓度更高的离子(K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、Cl^-)数量也更多, 其中K^+和Ca^{2+}浓度在不同叶习性间差异显著(p<0.05)(附表S6). 造成不同叶习性植物上述养分富集差异的原因, 除常绿和落叶植物本身的形态和生理生态特征差异之外, 也跟野外观测的实验设置有关. 当前冠层降水再分配研究多集中于植物生长季, 对处于休眠期的落叶物种观测严重不足, 因此不合理的样本结构对揭示不同叶习性植物在冠层降水再分配驱动下的养分富集效应存在一定干扰.

(4) 林分类型. 混交林(降水n=81, 穿透雨n=79, 树干茎流n=49)相较于纯林(降水n=63, 穿透雨n=65, 树干茎流n=49)具有养分富集优势, 其树干茎流和穿透雨养分平均淋溶系数平均约1.2倍和1.1倍于纯林, 淋溶系数更大的离子种类也相对更丰富(图3), 尤其在树干茎流中淋溶系数更大的离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-})远多于纯林(附表S7). 可能与混交林冠层形态相对复杂、垂直结构发育相对完整有关, 不仅有利于截获大气颗粒物, 也促进了穿透雨和树干茎流对冠层沉积物的冲刷携运效率. 然而, 混交林养分富集优势在离子浓度上并未体现, 反而是纯林树干茎流和穿透雨离子平均浓度分别1.3倍和1.4倍于混交林(附表S7). 部分原因可能在于, 本文统计的纯林区域降水背景值更高, 离子平均浓度约1.4倍于混交林区域.

在本文所统计离子中, SO_4^{2-}和Cl^-在以上不同植被类型的树干茎流和穿透雨中平均浓度最高(图4), 而K^+和Mg^{2+}则依次为淋溶系数最高的无机养分(图3). 该规律与沿降水和温度梯度的离子浓度趋势一致, 再次印证了冠层降水再分配过程对K^+的强烈富集能力.

5.4 不同生态系统类型富集特征对比

依据是否受到人为干扰, 本文将生态系统分为自然生态系统和人工生态系统, 后者包括城市生态系统、农田生态系统、人工林生态系统等类型(刘亚群等, 2021). 冠层降水再分配驱动的养分富集效应在自然和人工生态系统类型之间存在明显差别(Jiang Z Y等, 2021).

人工生态系统(降水n=84, 穿透雨n=81, 树干茎流n=58)具有冠层降水再分配驱动养分富集的浓度优势, 树干茎流和穿透雨离子浓度分别平均是自然生态系统的1.2倍和1.6倍(图4). 该优势尤其体现于穿透雨, 其所有离子(K^+、Na^+、Mg^{2+}、NH_4^+、Ca^{2+}、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-})浓度均高于自然生态系统(降水n=111, 穿透雨n=112, 树干茎流n=65), 其中K^+、Na^+、Mg^{2+}和NH_4^+浓度显著更高(p<0.05)(附表S8). 这与人工生态系统中存在诸如工农业生产、居民生活、交通运输、矿石燃料燃烧等强烈干扰, 使得该区域养分输入来源复杂、输入总量增多, 增加的降水背景浓度和冠层沉积物间接导致树干茎流和穿透雨浓度升高. 然而, 由于影响树干茎流和穿透雨的因子各异, 降水中背景离子增量与冠层降水再分配组分中离子增量并非简单的线性关系, 是造成树干茎流和穿透雨养分淋溶系数变化存在不确定性的重要原因. 因此, 本文发现尽管人工生态系统穿透雨淋溶系数高于自然生态系统, 富集效应更强, 但树干茎流养分淋溶系数却总体低于自然生态系统, 表现出偏弱的富集作用(图3). 可能原因在于, 较之穿透雨, 树干茎流产流和导流更易受到冠层

结构、枝干形态、附生植物等诸多因素的复杂影响, 导致人工生态系统中增加的养分输入量对穿透雨富集效应影响更加直接.

5.5　不同冠层降水再分配组分富集特征对比

在冠层降水再分配驱动下, 穿透雨和树干茎流均可高效富集养分, 但以树干茎流的养分富集效应尤为显著. 根据离子浓度数据分析, 不同干湿区、温度带、植物生活型、叶形态、叶习性、林分类型、生态系统类型的树干茎流平均浓度分别是穿透雨离子浓度的1.9倍、2.2倍、3.0倍、2.2倍、1.9倍、1.9倍、1.9倍(图4, 附表S2~S8). 尽管存在不同类型间降水离子背景浓度差异可能造成的不确定性, 但与穿透雨浓度平均约2.1倍的明显区别间接突出了树干茎流高效富集无机养分的相对优势. 这可能与树干茎流需沿枝干顺流而下, 较之穿透雨产流路径更曲折、产流时间更长(Yuan等, 2019)有关, 这使得树干茎流与冠层枝干表面附着的干沉降、植物分泌物、附生植物代谢产物、冠层生物排泄物等充分接触(Su等, 2019). 上述结论获得了淋溶系数分析结果的直接印证. 相较于穿透雨, 树干茎流无机养分淋溶系数在不同干湿区(4.8)、温度带(4.6)、植物生活型(8.6)、叶形态(4.8)、叶习性(4.6)、林分类型(4.5)、生态系统类型(4.6)中, 分别是穿透雨淋溶系数的2.0倍、2.1倍、3.1倍、2.1倍、1.9倍、2.0倍、2.0倍(图3, 附表S2~S8). 参考van Stan等(2020)基于全球不同气候区644条观测数据, 穿透雨量约占次降水量的75.8%, 是树干茎流量(2.2%)的34.5倍. 结合二者离子浓度间约2.1的倍数关系, 可粗略估算经穿透雨携运的无机养分总量约为树干茎流富集总量的16.4倍. 该结论与Muoghalu和Oakhumen(2000)对尼日利亚次生低地雨林的观测结果一致. 其中, 穿透雨中Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^{+}、Na^{+}、Mn^{2+}、Fe^{3+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}年输运量(kg ha^{-1} a^{-1})分别是树干茎流中相应离子输运量的13.8倍、13.8倍、9.4倍、25.7倍、5.4倍、11.6倍、35.7倍和9.3倍, 即穿透雨携运的无机养分量约为树干茎流的15.6倍. 加之树干茎流通常比穿透雨具有更短的起流和峰值时滞, 止流更晚(Yuan等, 2017, 2019), 通过单位生物量增长可获得的树干茎流形式水分收益更多(Yuan等, 2016), 更短的土壤水分响应时长(Yuan等, 2022), 以及具备直达根区的优先流路径(Guo等, 2020), 因此树干茎流富集养分的效率优势突出, 而穿透雨则是养分富集总量的最主要贡献者.

综上, 全球不同干湿区、温度带、植被和生态系统类型由冠层降水再分配驱动的养分富集特征各异. 随年均降水量增加, 穿透雨和树干茎流离子浓度显著下降(p<0.01), 而淋溶系数则以幂函数形式总体呈增大趋势(R^2≤0.41, p<0.01), 其中极湿润区淋溶系数分别1.3倍和1.8倍于干旱半干旱区. 随年均温增加, 二者离子浓度总体呈降低趋势, 但淋溶系数变化趋势却相对复杂, 比如穿透雨中K^{+}、Mg^{2+}和Cl^{-}淋溶系数随之增加而增大(p<0.01), 树干茎流中Na^{+}、Mg^{2+}和Cl^{-}淋溶系数却随之减小(p<0.01). 灌木、针叶植物、混交林穿透雨和树干茎流淋溶系数分别是乔木、阔叶植物、纯林的1.5倍和3.0倍、1.1倍和1.5倍、1.1倍和1.2倍. 人工生态系统养分富集浓度优势明显, 其穿透雨和树干茎流离子浓度分别是自然生态系统的1.6倍和1.2倍. 此外, 树干茎流在不同气候带和植被类型间的离子浓度约1.9至3.0倍于穿透雨不等, 具有富集养分的浓度优势; 而穿透雨携运无机养分总量约为树干茎流的16.4倍, 呈显著的富集养分数量优势.

6　结论与展望

受冠层降水再分配驱动的养分富集效应调控, 陆地生态系统的关键水分及养分循环在一定时空范围内均处于动态平衡, 深刻影响着物质循环、能量流动、信息传递等生态系统基本功能, 发育并维持着特定生态系统结构, 与水源涵养、土壤保持、碳固定、生物多样性保护等生态系统服务息息相关(傅伯杰等, 2020). 当前气候变化和人类活动干扰加剧, 水文过程与植被相互作用机制愈加复杂(杨大文等, 2010), 预测难度递增, 复合人地系统动态互馈尤为突出(王帅等, 2020). 深入理解陆地生态系统尺度相关的关键生态水文和生物地球化学过程, 不仅有助于阐明包括纵向岭谷、跨境流域、西南山地等代表性重要生境生态系统多样性和土壤生产力变化的驱动因子(Duan等, 2015)、量化区域生态安全阈值(何大明等, 2005)、分析生态安全格局演变(刘国华, 2016)等关键科学问题, 同时也是目前生态学研究所面临的重大挑战(徐宪立等, 2006). 因此, 研究冠层降水再分配驱动的养分富集效应具有重要性、必要性和紧迫性.

本文基于全球尺度系统对比了不同干湿区、温度

带、植被类型、生态系统类型和冠层降水再分配组分的养分富集特征. 结果显示, 当前研究多关注具有养分富集总量优势的穿透雨, 对富集效率优势更突出的树干茎流关注相对不足, 主要探讨自然生态系统中乔木层的林冠截留及其养分富集. 建议未来研究在保证充足样本数量的前提下, 充分考虑树干茎流的富集优势, 结合根系功能性状、土壤优先流和土壤水力侵蚀过程分析, 综合评估包含土壤水分再分配的降水再分配全过程对养分富集、迁移、转化过程的重要影响, 并重点聚焦以下内容:

(1) 重视人工生态系统. 城市和农田是典型的人工生态系统. 其中, 城市生态系统固化下垫面使其局地气候和外部环境变异性加剧, 人工栽种涉及的选种、修枝、疏伐等, 改变了植被的自然冠层结构、林龄、密度等特征. 此外, 工业、交通、居民生活等高氮、高硫外源输入, 影响穿透雨和树干茎流携运的养分种类和数量, 造成NO_3^-和SO_4^{2-}通量往往显著高于自然生态系统. 在农业生态系统中, 树干茎流可促进植物对主要施于根际土壤的肥料吸收. 但茎流量过多、强度过大时, 易造成肥料淋溶并可能引起作物减产, 造成的面源污染关乎流域内河湖水质. 综上, 城市和农田生态系统提供独特的生态系统服务, 伴随城市化发展和气候变化, 以二者为代表的人工生态系统重要性愈加重要. 对人工生态系统的关注不足, 严重限制了深入理解人类活动在生态系统水文和地球化学循环中的作用.

(2) 关注干旱生态系统. 干旱区约占全球陆地面积的四成, 区域降水匮乏且年际年内波动较大, 植被类型多以灌草为主, 属于典型的生态脆弱区. 作为干旱生态系统重要水源, 阐明冠层如何拦截并再分配降水, 以及在此过程中如何富集养分, 对理解旱区植被生存策略、提高生态系统生产力至关重要. 当前冠层降水再分配研究多关注水热条件相对优良生境中的乔木物种, 尽管对干旱半干旱区灌木物种的重视程度逐年提升, 但相关研究多集中在水文过程, 对冠层降水再分配驱动的养分富集效应研究明显不足. 建议未来研究充分考虑以脉冲型降水为特征的水资源补给形式, 探讨冠层降水再分配驱动养分富集对干旱生态系统典型灌草植被水养分获取策略的影响.

(3) 强调林下灌草层. 乔木层、灌木层和草本层共同构成了森林生态系统典型的垂直结构. 其中, 灌草层可对降水进行二次截留和再分配, 直接作用于穿透雨和树干茎流的养分富集过程, 影响土壤水养分输入的空间异质性及其时间稳定性. 然而, 当前研究集中关注乔木层, 对林下灌草层截留引起的水文过程和养分循环关注不足. 部分原因在于灌草物种个体小、种类多, 且无确定冠层形态, 观测相对困难. 建议未来研究创新观测手段, 刻画林下灌草层对降水的二次截留水文动态和养分富集过程, 准确评估森林生态系统的水养分收支及其重要生态意义.

(4) 完善研究指标系统. 穿透雨和树干茎流携运大量养分物质汇至冠层下, 部分被植物吸收和土壤固持, 部分沿径流流出, 构成了陆地生态系统的重要养分运移过程. 当前针对上述过程的定量研究还存在量化指标不系统的问题, 重点关注了可溶性无机养分的浓度、数量、富集效率等, 对颗粒态和有机养分研究不足, 严重缺乏养分滞留、周转等关键的时间动态指标, 同时无法准确量化冠层降水再分配驱动的养分富集量占不同地理格局下各植被生态系统类型养分总量的比值. 其中, 对植物休眠季, 以及冠层降雪截留研究尤为匮乏. 此外, 当前研究分别对冠层降水再分配和土壤水分再分配开展了长期的系统研究, 但对穿透雨、树干茎流如何影响土壤水分入渗及其空间分布关注不足, 且研究不够深入. 建议未来研究充分考虑运移过程、时间动态、空间格局及其尺度效应, 完善养分指标系统, 并在此基础上综合考虑冠层降水再分配驱动下可溶性和颗粒态养分富集效应的数量、速率、富集效应等关键因子, 关注基于冠层截留和土壤水分入渗的降水再分配完整过程, 阐明根-土界面的水分和养分耦合作用, 系统开展关键带水分再分配过程及其机理研究.

致谢 感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

傅伯杰, 田汉勤, 陶福禄, 赵文武, 王帅. 2020. 全球变化对生态系统服务的影响研究进展. 中国基础科学, 22: 25–30

何大明, 吴绍洪, 彭华, 杨志峰, 欧晓昆, 崔保山. 2005. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 20: 338–344

黄智军, 刘青青, 侯晓龙, 吴鹏飞, 靳聪, 马祥庆. 2018. 长汀不同郁闭度马尾松林降雨淋溶养分输入特征. 森林与环境学报, 38: 129–134

李小雁. 2011. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, 12: 1721–1730
李中恺, 李小雁, 周沙, 杨晓帆, 付永硕, 缪驰远, 王帅, 张光辉, 吴秀臣, 杨超, 邓元红. 2022. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 52: 2105–2138
刘国华. 2016. 西南生态安全格局形成机制及演变机理. 生态学报, 36: 7088–7091
刘美珍, 孙建新, 蒋高明, 董鸣. 2006. 植物-土壤系统中水分再分配作用研究进展. 生态学报, 26, 1550–1557
刘世荣, 常建国, 孙鹏森. 2007. 森林水文学: 全球变化背景下的森林与水的关系. 植物生态学报, 5: 753–756
刘亚群, 吕昌河, 傅伯杰, 于伯华. 2021. 中国陆地生态系统分类识别及其近20年的时空变化. 生态学报, 41: 3975–3987
欧阳帅, 项文化, 陈亮, 曾叶霖, 胡彦婷, 雷丕锋, 方晰, 邓湘雯. 2021. 南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制. 水土保持学报, 35: 1–9
沈浩, 蔡佳宁, 李萌姣, 陈青, 叶万辉, 王峥峰, 练琚愉, 宋亮. 2017. 中国森林冠层生物多样性监测. 生物多样性, 25: 229–236
苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 王洪岩, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 2012. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系. 生态学报, 32: 6705–6714
苏华, 刘伟, 李永庚. 2014. 水分再分配对土壤-植物系统养分循环的生态意义. 植物生态学报, 38: 1019–1028
王根绪, 夏军, 李小雁, 杨达, 胡兆永, 孙守琴, 孙向阳. 2021. 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从植物叶片到流域. 科学通报, 66: 3667–3683
王帅, 傅伯杰, 武旭同, 王亚萍. 2020. 黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性. 资源科学, 42: 96–103
王婷, 周道玮, 神祥金, 范高华, 张慧. 2020. 中国柯本气候分类. 气象科学, 40: 752–760
王彦辉. 2001. 几个树种的林冠降雨特征. 林业科学, 4: 2–9
王云强, 邵明安, 胡伟, Henry Lin, 黄辉. 2016. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征. 地球与环境, 44: 391–397
魏晓华, 周晓峰. 1989. 三种阔叶次生林的茎流研究. 生态学报, 4: 325–329
魏晓华, 周晓峰. 1993. 蒙古栎林生态系统的水分循环与养分循环关系. 农村生态环境, 1: 1–5, 62
席承藩, 张俊民, 丘宝剑, 刘东来. 1984. 中国自然区划概要. 北京: 科学出版社. 165
夏军, 张永勇, 穆兴民, 左其亭, 周宇建, 赵广举. 2020. 中国生态水文学发展趋势与重点方向. 地理学报, 75: 445–457
徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 2006. 植被与水土流失关系研究进展. 生态学报, 26: 3137–3143
杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 2010. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述. 水利学报, 41: 1142–1149
易浩宇, 闫文德, 梁小翠, 欧阳硕龙, 欧阳泽怡, 郭津, 何丹. 2014. 酸雨胁迫下樟树林降水中无机阴离子变化特征. 生态学报, 34: 6528–6537
余新晓. 2013. 森林生态水文研究进展与发展趋势. 应用基础与工程科学学报, 21: 391–402
袁川. 2017. 半干旱区典型灌木降水再分配模式与影响机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–139
张亚峰, 王新平, 虎瑞, 潘颜霞. 2013. 荒漠灌丛降雨再分配对土壤pH值的影响. 中国沙漠, 33: 1400–1405
赵文智, 程国栋. 2001. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 22: 1851–1857
周瑞莲, 赵彦宏, 赵哈林, 赵学勇. 2012. 钠盐对冬小麦抗旱性增效作用调控机理的生理生态学分析. 中国沙漠, 32: 784–792
朱永官, 李刚, 张甘霖, 傅伯杰. 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. 地理学报, 70: 1859–1869
Adriaenssens S, Hansen K, Staelens J, Wuyts K, De Schrijver A, Baeten L, Boeckx P, Samson R, Verheyen K. 2012. Throughfall deposition and canopy exchange processes along a vertical gradient within the canopy of beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). Sci Total Environ, 420: 168–182
Arango C, Ponette-González A, Neziri I, Bailey J. 2019. Western spruce budworm effects on throughfall N, P, and C fluxes and soil nutrient status in the Pacific Northwest. Can J For Res, 49: 1207–1218
Aubrey D P. 2020. Relevance of precipitation partitioning to the tree water and nutrient balance. In: van Stan J T, Gutmann E, Friesen J, eds. Precipitation Partitioning by Vegetation. Cham: Springer. 147–162
Beard K H, Vogt K A, Kulmatiski A. 2002. Top-down effects of a terrestrial frog on forest nutrient dynamics. Oecologia, 133: 583–593
Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data, 5: 180214
Brinson M M, Bradshaw H D, Holmes R N, Elkins Jr J B. 1980. Litterfall, stemflow, and throughfall nutrient fluxes in an alluvial swamp forest. Ecology, 61: 827–835
Cayuela C, Levia D F, Latron J, Llorens P. 2019. Particulate matter fluxes in a Mediterranean mountain forest: Interspecific differences between throughfall and stemflow in oak and pine stands. J Geophys Res-Atmos, 124: 5106–5116
Chiwa M, Kim D H, Sakugawa H. 2003. Rainfall, stemflow, and throughfall chemistry at urban- and mountain-facing sites at Mt. Water Air Soil Pollut, 146: 93–109
Chuyong G B, Newbery D M, Songwe N C. 2004. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. Biogeochemistry, 67: 73–91
Dantas de Paula M, Forrest M, Langan L, Bendix J, Homeier J, Velescu

A, Wilcke W, Hickler T. 2021. Nutrient cycling drives plant community trait assembly and ecosystem functioning in a tropical mountain biodiversity hotspot. New Phytol, 232: 551–566

de Oliveira Leite J, Valle R R. 1990. Nutrient cycling in the cacao ecosystem: Rain and throughfall as nutrient sources for the soil and the cacao tree. Agric Ecosyst Environ, 32: 143–154

Dezzeo N, Chacón N. 2006. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. For Ecol Manage, 234: 218–226

Duan X W, Li R, Zhang G L, Hu J M, Fang H Y. 2015. Soil productivity in the Yunnan province: Spatial distribution and sustainable utilization. Soil Tillage Res, 147: 10–19

Durocher M G. 1990. Monitoring spatial variability of forest interception. Hydrol Process, 4: 215–229

Erisman J W, Draaijers G. 2003. Deposition to forests in Europe: Most important factors influencing dry deposition and models used for generalisation. Environ Pollut, 124: 379–388

Franco-Navarro J D, Brumós J, Rosales M A, Cubero-Font P, Talón M, Colmenero-Flores J M. 2016. Chloride regulates leaf cell size and water relations in tobacco plants. J Exp Bot, 67: 873–891

Freer-Smith P H, El-Khatib A A, Taylor G. 2004. Capture of particulate pollution by trees: A comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus Nitida* and *Eucalyptus Globulus*) with European and North American species. Water Air Soil Pollut, 155: 173–187

Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. 2010. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. J Hydrol, 389: 363–372

Guo L, Lin H. 2016. Critical Zone research and observatories: Current status and future perspectives. Vadose Zone J, 15: 1–14

Guo L, Mount G J, Hudson S, Lin H, Levia D F. 2020. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots. Geoderma, 357: 113953

Herwitz S R, Levia Jr. D F. 1997. Mid-winter stemflow drainage from Bigtooth Aspen (*Populus Grandidentata* Michx.) in central Massachusetts. Hydrol Process, 11: 169–175

Heshmatol Vaezin S M, Juybari M M, Daei A, Avatefi Hemmat M, Shirvany A, Tallis M J, Hirabayashi S, Moeinaddini M, Hamidian A H, Sadeghi S M M, Pypker T G. 2021. The effectiveness of urban trees in reducing airborne particulate matter by dry deposition in Tehran, Iran. Environ Monit Assess, 193: 842

Hofhansl F, Wanek W, Drage S, Huber W, Weissenhofer A, Richter A. 2011. Topography strongly affects atmospheric deposition and canopy exchange processes in different types of wet lowland rainforest, Southwest Costa Rica. Biogeochemistry, 106: 371–396

Holder C D. 2004. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. For Ecol Manage, 190: 373–384

Jiang B, Xie Z Q, Lam P K S, He P Z, Yue F G, Wang L Q, Huang Y K, Kang H, Yu X W, Wu X D. 2021. Spatial and temporal distribution of sea salt aerosol mass concentrations in the marine boundary layer from the Arctic to the Antarctic. J Geophys Res-Atmos, 126: e2020JD033892

Jiang Z Y, Zhi Q Y, van Stan J T, Zhang S Y, Xiao Y H, Chen X Y, Yang X, Zhou H Y, Hu Z M, Wu H W. 2021. Rainfall partitioning and associated chemical alteration in three subtropical urban tree species. J Hydrol, 603: 127109

Johnson M S, Lehmann J. 2006. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow. Ecoscience, 13: 324–333

Katsushima T, Kato A, Aiura H, Nanko K, Suzuki S, Takeuchi Y, Murakami S. 2023. Modelling of snow interception on a Japanese cedar canopy based on weighing tree experiment in a warm winter region. Hydrol Process, 37: e14922

Koichiro K, Yuri T, Nobuaki T, Isamu K. 2001. Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. Hydrol Process, 15: 1967–1978

Köppen R. 1936. Kristallisationsvorgänge in Kaliumchloridlösungen. Z Anorg Allg Chem, 228: 169–174

Levia D F. 2003. Winter stemflow leaching of nutrient-ions from deciduous canopy trees in relation to meteorological conditions. Agric For Meteorol, 117: 39–51

Levia D F, Herwitz S R. 2000. Physical properties of water in relation to stemflow leachate dynamics: Implications for nutrient cycling. Can J For Res, 30: 662–666

Levia D F, Germer S. 2015. A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. Rev Geophys, 53: 673–714

Levia D F, van Stan J T, Siegert C M, Inamdar S P, Mitchell M J, Mage S M, McHale P J. 2011. Atmospheric deposition and corresponding variability of stemflow chemistry across temporal scales in a mid-Atlantic broadleaved deciduous forest. Atmos Environ, 45: 3046–3054

Levia D F, van Stan J T, Inamdar S P, Jarvis M T, Mitchell M J, Mage S M, Scheick C E, Mchale P J. 2012. Stemflow and dissolved organic carbon cycling: Temporal variability in concentration, flux, and UVVis spectral metrics in a temperate broadleaved deciduous forest in the eastern United States. Can J For Res, 42: 207–216

Levia D F, Michalzik B, Bischoff S, Näthe K, Legates D R, Gruselle M, Richter S. 2013. Measurement and modeling of diameter distributions of particulate matter in terrestrial solutions. Geophys Res Lett, 40: 1317–1321

Levia D F, Hudson S A, Llorens P, Nanko K. 2017. Throughfall drop size distributions: A review and prospectus for future research. WIREs Water, 4: e1225

Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, Johnson D W. 1986. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. Science, 231: 141–145

Lu J, Zhang S X, Fang J P, Yan H A, Li J R. 2017. Nutrient fluxes in rainfall, throughfall, and stemflow in *Pinus densata* natural forest of Tibetan Plateau. CLEAN Soil Air Water, 45: 1600008

Małek S. 2001. Quantitative and qualitative changes of precipitation input to the Ojców National Park (South Poland) during 1997–1999. Water Air Soil Pollut, 130: 505–510

Mantovani V A, Terra M C N S, de Mello C R, Rodrigues A F, de Oliveira V A, Pinto L O R. 2022. Spatial and temporal patterns in carbon and nitrogen inputs by net precipitation in Atlantic forest, Brazil. For Sci, 68: 113–124

Mantovani V A., Terra M C N S, Rodrigues A F, Cordeiro N G, de Mello J M, de Mello C R. 2023. Biotic and abiotic drivers of stemflow carbon enrichment ratio in tropical trees. Trees, 37: 467–483

Marschnert H, Kirkby E A, Engels C. 1997. Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development. Botanica Acta, 110: 265–273

Martinez-Meza E, Whitford W G. 1996. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. J Arid Environ, 32: 271–287

Moeslund J E, Arge L, Bøcher P K, Dalgaard T, Odgaard M V, Nygaard B, Svenning J C. 2013. Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region. Ecosphere, 4: 1–26

Mullin K E, Barata I M, Dawson J, Orozco-terWengel P. 2022. First extraction of eDNA from tree hole water to detect tree frogs: A simple field method piloted in Madagascar. Conservation Genet Resour, 14: 99–107

Muoghalu J I, Oakhumen A. 2000. Nutrient content of incident rainfall, throughfall and stemflow in a Nigerian secondary lowland rain-forest. Appl Vegetation Sci, 3: 181–188

Niu X T, Fan J, Xing T Z. 2023. Stemflow temporal dynamics differ significantly between standing live and dead branches of two xerophytic shrub species. J Hydrol, 625: 130053

Oka A, Takahashi J, Endoh Y, Seino T. 2021a. Bark effects on stemflow chemistry in a Japanese temperate forest I. The role of bark surface morphology. Front For Glob Change, 4: 654375

Oka A, Takahashi J, Endoh Y, Seino T. 2021b. Bark effects on stemflow chemistry in a Japanese temperate forest II. The role of bark anatomical features. Front For Glob Change, 4: 657850

Oyarzún C E, Godoy R, De Schrijver A, Staelens J, Lust N. 2005. Water chemistry and nutrient budgets in an undisturbed evergreen rainforest of southern Chile. Biogeochemistry, 71: 107–123

Parker G G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Adv Eco Res, 13: 57–133

Sheng H C, Guo N, Ju C Y, Cai T J. 2022. Variation of nutrient fluxes by rainfall redistribution processes in the forest canopy of an urban larch plantation in northeast China. J For Res, 33: 1259–1269

Siegert C M, Levia D F, Leathers D J, van Stan J T, Mitchell M J. 2017. Do storm synoptic patterns affect biogeochemical fluxes from temperate deciduous forest canopies? Biogeochemistry, 132: 273–292

Su L, Zhao C, Xu W T, Xie Z Q. 2019. Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest. Forests, 10: 507

Su L, Qi L Y, Li X L, Liu Y C, Miao Y. 2023. Changes in throughfall induced by low-severity fire in a coniferous and broadleaved mixed forest. Hydrol Process, 37: e15001

Talkner U, Krämer I, Hölscher D, Beese F O. 2010. Deposition and canopy exchange processes in central-German beech forests differing in tree species diversity. Plant Soil, 336: 405–420

Tonello K C, Rosa A G, Pereira L C, Matus G N, Guandique M E G, Navarrete A A. 2021. Rainfall partitioning in the Cerrado and its influence on net rainfall nutrient fluxes. Agric For Meteorol, 303: 108372

Tucker A, Levia D F, Katul G G, Nanko K, Rossi L F. 2020. A network model for stemflow solute transport. Appl Math Model, 88: 266–282

Ulrich B. 1983. Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO_2, alkali and earth alkali cations and chloride. In: Ulrich B, Pankrath J, eds. Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. Dordrecht: Springer

van Stan J T, Pypker T G. 2015. A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. Sci Total Environ, 536: 813–824

van Stan J T, Levia D F, Inamdar S P, Lepori-Bui M, Mitchell M J. 2012. The effects of phenoseason and storm characteristics on throughfall solute washoff and leaching dynamics from a temperate deciduous forest canopy. Sci Total Environ, 430: 48–58

van Stan J T, Gutmann E, Friesen J. 2020. Precipitation partitioning by vegetation: A global synthesis. Cham: Springer

van Stan J T, Ponette-González A G, Swanson T, Weathers K C. 2021. Throughfall and stemflow are major hydrologic highways for particulate traffic through tree canopies. Front Ecol Environ, 19: 404–410

Xu Q C, Wu F Z, Peng Y, Hedněc P, Ni X Y, Tan S, Huang Y B, Yue

K. 2023. Effects of forest transformation on the fluxes of potassium, calcium, sodium, and magnesium along with rainfall partitioning. Pol J Environ Stud, 32: 4341–4351

Xu X W, Yu X X, Mo L, Xu Y S, Bao L, Lun X X. 2019. Atmospheric particulate matter accumulation on trees: A comparison of boles, branches and leaves. J Clean Prod, 226: 349–356

Yan X, Zhou M X, Dong X C, Zou S B, Xiao H L, Ma X F. 2015. Molecular mechanisms of foliar water uptake in a desert tree. AoB PlantS, 7, doi: 10.1093/aobpla/plv129

Yin Y, Zhou Y B, Li H, Zhang S Z, Fang Y, Zhang Y J, Zou X. 2022. Linking tree water use efficiency with calcium and precipitation. Tree Physiol, 42: 2419–2431

Yuan C, Gao G Y, Fu B J. 2016. Stemflow of a xerophytic shrub (*Salix psammophila*) in northern China: Implication for beneficial branch architecture to produce stemflow. J Hydrol, 539: 577–588

Yuan C, Gao G Y, Fu B J. 2017. Comparisons of stemflow and its bio-/abiotic influential factors between two xerophytic shrub species. Hydrol Earth Syst Sci, 21: 1421–1438

Yuan C, Gao G Y, Fu B J, He D M, Duan X W, Wei X H. 2019. Temporally dependenteffectsofrainfallcharacteristicsoninter-andintra-eventbranch-scalestemflowvariability in twoxerophyticshrubs. Hydrol Earth Syst Sci, 23: 4077–4095

Yuan C, Guo L, Levia D F, Rietkerk M, Fu B J, Gao G Y. 2022. Quantity or efficiency: Strategies of self-organized xerophytic shrubs to harvest rain. Water Resour Res, 58: e2022WR032008

Yue K, de Frenne P, Fornara D A, Van Meerbeek K, Li W, Peng X, Ni X Y, Peng Y, Wu F Z, Yang Y S, Peñuelas J. 2021. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs. Glob Change Biol, 27: 3350–3357

Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, Hu R. 2016. Variations of nutrients in gross rainfall, stemflow, and throughfall within revegetated desert ecosystems. Water Air Soil Pollut, 227: 183

Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, Hu R. 2020. Relative contribution of biotic and abiotic factors to stemflow production and funneling efficiency: A long-term field study on a xerophytic shrub species in Tengger Desert of northern China. Agric For Meteorol, 280: 107781

Zhang Y F, Yuan C, Chen N, Levia D F. 2023. Rainfall partitioning by vegetation in China: A quantitative synthesis. J Hydrol, 617: 128946

Zimmermann A, Germer S, Neill C, Krusche A V, Elsenbeer H. 2008. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest. J Hydrol, 360: 87–102

Zittis G, Bruggeman A, Lelieveld J. 2021. Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. Weather Clim Extrem, 34: 100380

(责任编委: 汤秋鸿)